

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini diperlukan referensi yang menyangkut dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya sebagai penunjang serta mendukung penelitian yang akan dilakukan. Sumber referensi meliputi jurnal, artikel, serta buku yang terkait dengan penelitian ini. Berikut beberapa kajian dan penelitian yang relevan dengan judul “Analisis Kinerja Fuzzy MPPT dengan Metode Kontrol Tidak Langsung pada Sistem Energi Surya”:

1. (Chen & Zhang, 2020)

Jurnal ini berjudul “*Adaptive Fuzzy MPPT for Photovoltaic Systems under Dynamic Irradiance CONditiONs*” yang membahas pengembangan metode MPPT berbasis fuzzy adaptif pada sistem PV. Penelitian ini menekankan kemampuan fuzzy logic untuk menyesuaikan *rule base* sesuai kondisi radiasi yang berubah-ubah, sehingga sistem mampu mencapai efisiensi 96%. Hasil penelitian menunjukkan fuzzy MPPT lebih cepat mencapai titik daya maksimum dibanding metode konvensional seperti P&O.

2. (Rahman & Haque, 2021)

Artikel ini berjudul “*Performance ComparisON of Fuzzy Logic MPPT and CONventiONal Algorithms*”. Penelitian ini membandingkan kinerja fuzzy MPPT dengan algoritma P&O pada sistem PV skala laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fuzzy MPPT memiliki respon yang lebih cepat dan stabil terhadap perubahan radiasi matahari dibanding metode konvensional, dengan pengurangan osilasi di sekitar MPP.

3. (Zhou et al., 2021)

Penelitian dengan judul “*Fuzzy-Based MPPT CONtrol for PV Systems Using Buck Converter under Partial Shading Conditions*” meneliti penerapan fuzzy MPPT pada *Buck Converter* dengan kondisi bayangan parsial. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fuzzy MPPT mampu melacak titik daya maksimum dengan efisiensi hingga

94% dan lebih unggul dibanding metode *Incremental Conductance* pada kondisi radiasi tidak merata.

4. (Khalil et al., 2022)

Artikel ini berjudul “*Experimental Implementation of Fuzzy MPPT ON Buck Converter*”. Penelitian dilakukan dengan implementasi perangkat keras menggunakan panel surya mini dan *Buck Converter*. Hasil eksperimen membuktikan bahwa fuzzy MPPT mampu meningkatkan efisiensi sistem hingga 95% dengan respon dinamis yang lebih baik dibanding algoritma MPPT konvensional.

5. (Kumar et al., 2022)

Dalam jurnal berjudul “*Hybrid MPPT Algorithm Using Fuzzy Logic and Incremental Conductance*”, penulis mengusulkan kombinasi metode fuzzy logic dengan *Incremental Conductance*. Penelitian menunjukkan daya keluaran meningkat hingga 10% dibanding penggunaan algoritma tunggal, dengan performa yang lebih adaptif terhadap perubahan cuaca mendadak.

6. (Singh & Verma, 2021)

Penelitian berjudul “*Indirect Control Strategy of Fuzzy MPPT for Photovoltaic Systems*” membahas implementasi metode kontrol tidak langsung dalam fuzzy MPPT. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kontrol tidak langsung memudahkan perancangan karena tidak membutuhkan model matematis detail dari PV, namun tetap mampu menghasilkan tracking cepat terhadap titik daya maksimum.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Energi Terbarukan dan Energi Surya

Energi terbarukan merupakan energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui secara alami, seperti tenaga surya, angin, hidro, biomassa, dan panas bumi. Pemanfaatan energi terbarukan menjadi semakin penting mengingat keterbatasan cadangan energi fosil dan dampak lingkungannya yang signifikan terhadap perubahan iklim (International Energy Agency, 2021; [1]).

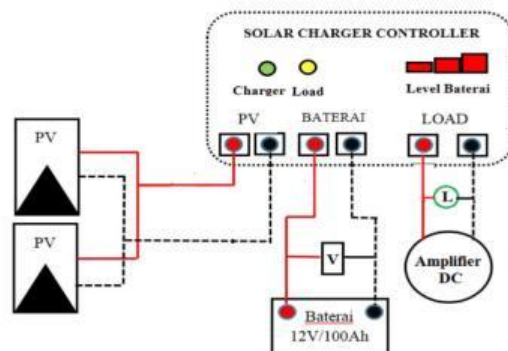
Indonesia merupakan negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa dengan potensi energi terbarukan yang sangat besar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan

oleh (Laksana, Sirait, dkk. 2021; [2]), rata-rata intensitas radiasi matahari di Indonesia mencapai 4,8 kWh/m². Meskipun demikian, implementasi teknologi panel surya masih menghadapi tantangan rendahnya efisiensi modul *photovoltaik* yang rata-rata hanya berkisar antara 15% hingga 16%. Oleh karena itu, diperlukan analisis karakteristik lokasi dan optimalisasi sistem agar penyerapan energi matahari dapat berlangsung secara maksimal."

Indonesia juga memiliki potensi energi terbarukan yang melimpah, khususnya energi surya. Hal ini didukung oleh letak geografis Indonesia yang berada di garis khatulistiwa dengan intensitas radiasi rata-rata 4,8–5,4 kWh/m² per hari (BPPT, 2020; [3]). Dengan potensi sebesar itu, energi surya dapat menjadi solusi penting untuk mendukung transisi energi nasional menuju target Net Zero Emission 2060.

Keunggulan energi surya antara lain ramah lingkungan, ketersediaan yang melimpah, serta cocok untuk sistem desentralisasi seperti pembangkit listrik skala kecil. Kekurangannya, energi surya sangat bergantung pada kondisi cuaca, intensitas cahaya, dan membutuhkan sistem kendali untuk mengoptimalkan kinerja panel surya (Green, 2019; [4]).

Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi listrik umumnya menggunakan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang terdiri dari beberapa komponen utama seperti modul *photovoltaik*, *solar charge controller*, baterai, dan beban. Sistem ini bekerja dengan mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang selanjutnya dapat disimpan atau digunakan langsung oleh beban. Diagram dasar sistem PLTS dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Diagram Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Berdasarkan gambar 2.1 yang menunjukkan diagram sistem *solar charge controller* dengan metode MPPT yang terhubung dengan panel surya, baterai, dan beban. Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama yang menghasilkan tegangan dan arus listrik. Energi dari panel surya kemudian masuk ke *solar charge controller* yang berfungsi mengatur proses pengisian baterai serta melindungi sistem dari *overcharge* dan *overdischarge*. Pada diagram terlihat bahwa *solar charge controller* mengatur aliran daya menuju baterai 12V/100Ah dan beban melalui terminal charger dan load. Terdapat indikator level baterai yang menunjukkan kondisi kapasitas baterai saat proses pengisian berlangsung. Selain itu, terdapat sensor tegangan dan arus yang digunakan untuk memantau kondisi sistem sehingga proses pengisian dapat berlangsung optimal. Dengan adanya sistem MPPT pada *charge controller*, panel surya dapat bekerja pada titik daya maksimum sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih efisien untuk pengisian baterai maupun suplai ke beban.

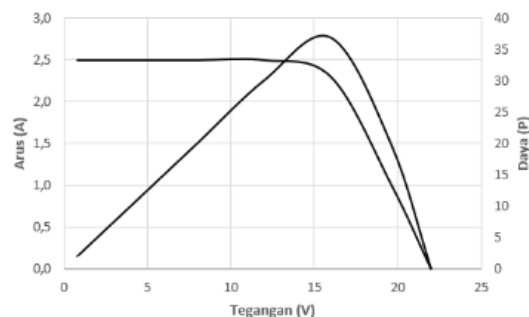
2.2.2 Prinsip Kerja Panel Surya (*Photovoltaic*)

Panel surya atau *photovoltaic* (PV) bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaiik, yaitu fenomena timbulnya beda potensial listrik pada material semikonduktor akibat paparan cahaya. Struktur dasar panel surya terdiri dari lapisan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk junction p-n. Ketika cahaya mengenai junction tersebut, foton dengan energi cukup akan membangkitkan pasangan elektron-hole. Elektron bergerak menuju sisi tipe-n, sementara hole menuju sisi tipe-p, sehingga tercipta arus listrik (Patel, 2008; [5]).

Keluaran daya dari panel surya memiliki karakteristik yang tidak linier dan sangat bergantung pada kondisi lingkungan, (Widyantoro, Sirait, dan Musafa, 2019;[6]) menjelaskan bahwa variabel utama yang mempengaruhi performa panel surya adalah intensitas cahaya matahari (iradiasi) dan suhu kerja panel. Peningkatan suhu pada sel surya justru dianalisis dapat menurunkan efisiensi konversi energi. Ketidakstabilan ini menyebabkan panel surya jarang bekerja pada titik daya maksimumnya jika dihubungkan langsung ke beban tanpa sistem kendali tambahan."

2.2.2.1 Karakteristik PV

Karakteristik panel surya merupakan salah satu aspek penting yang perlu dipahami dalam sistem fotovoltaik karena berkaitan langsung dengan kemampuan panel dalam menghasilkan energi listrik. Setiap panel surya memiliki karakteristik hubungan antara arus, tegangan, dan daya keluaran yang bersifat *nonlinier* serta dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti irradiansi dan temperatur. Untuk mengetahui kinerja panel surya secara lebih jelas, karakteristik tersebut biasanya direpresentasikan dalam bentuk kurva arus terhadap tegangan (I–V) dan kurva daya terhadap tegangan (P–V). Melalui kedua kurva ini dapat diketahui titik kerja optimal panel surya atau *Maximum Power Point* (MPP), yaitu kondisi di mana panel menghasilkan daya maksimum sehingga sistem dapat dirancang agar mampu bekerja secara optimal pada berbagai kondisi operasi. Karakteristik panel surya umumnya digambarkan dalam bentuk kurva arus–tegangan (I–V) dan daya–tegangan (P–V) dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. 2 Kurva Karakteristik I–V dan P–V Panel Surya

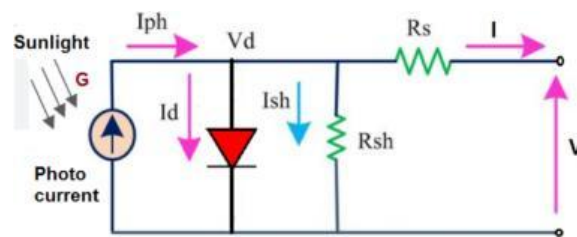
Sumber : Nurdiansyah at al. (2023)

Berdasarkan gambar 2.2 terlihat ada dua jenis kurva karakteristik panel surya, yaitu kurva I–V dan kurva P–V. Kurva I–V ditunjukkan oleh garis yang berada di bagian atas dan cenderung relatif datar pada tegangan rendah hingga menengah, kemudian menurun tajam saat mendekati tegangan maksimum (sekitar 20–22 V). Kurva ini menggunakan sumbu vertikal kiri dengan satuan arus (A). Sementara itu, kurva P–V ditunjukkan oleh garis yang berbentuk lengkungan seperti parabola yang naik dari nol, mencapai puncak, lalu turun kembali hingga nol saat tegangan maksimum tercapai. Kurva P–V menggunakan sumbu vertikal

kanan dengan satuan daya (W). Titik puncak pada kurva P–V merupakan titik daya maksimum atau *Maximum Power Point* (MPP), yaitu kondisi di mana panel surya menghasilkan daya tertinggi. Dengan demikian, pada gambar tersebut sudah terlihat jelas dua kurva sekaligus, di mana kurva I–V menggambarkan hubungan arus terhadap tegangan, sedangkan kurva P–V menunjukkan hubungan daya terhadap tegangan panel surya. Berdasarkan kurva tersebut dapat dipahami bahwa panel surya memiliki satu titik kerja optimal pada setiap kondisi irradiansi, sehingga diperlukan sistem MPPT untuk menjaga panel tetap beroperasi pada titik daya maksimum.

2.2.2.2 Persamaan Matematis PV

Model matematis panel surya digunakan untuk menggambarkan hubungan antara arus dan tegangan keluaran sel fotovoltaik secara analitis. Persamaan matematis ini diperoleh berdasarkan rangkaian ekivalen sel surya yang merepresentasikan karakteristik internal panel, seperti sumber arus fotovoltaik, dioda, resistansi seri (R_s), dan resistansi *shunt* (R_{sh}). Model ini digunakan untuk menganalisis pengaruh irradiansi dan temperatur terhadap arus serta tegangan keluaran panel surya. Rangkaian ekivalen panel surya yang digunakan sebagai dasar penurunan persamaan matematis dapat dilihat pada Gambar 2.x.



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekivalen Sel Surya (Single *Diode* Model)

Setelah rangkaian ekivalen pada Gambar 2.3, hubungan antara arus dan tegangan keluaran panel surya dapat dianalisis menggunakan persamaan matematis berdasarkan model single *diode*. Model rangkaian tersebut merepresentasikan karakteristik sel surya yang dipengaruhi oleh arus foton, arus dioda, resistansi seri, dan resistansi *shunt*.

Berdasarkan rangkaian ekivalen sel surya tersebut, maka hubungan arus keluaran panel surya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matematis *diode* tunggal sebagai berikut (Villalva et al., 2019; [7]):

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

dengan:

I_{ph} = arus foton

I_0 = arus saturasi *diode*

q = muatan elektron

V = tegangan keluaran

IR_s = resistansi seri

R_{sh} = resistansi *shunt*

n = faktor idealitas *diode*

T = temperatur

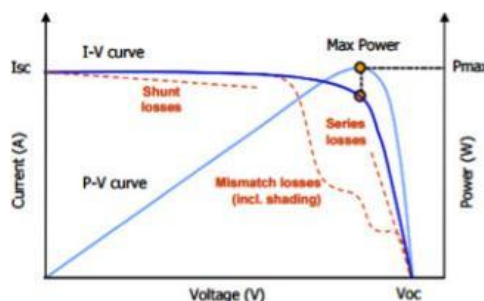
Persamaan ini menunjukkan bahwa tegangan dan arus keluaran PV dipengaruhi oleh intensitas cahaya dan suhu.

Keterangan: Persamaan (2.1) menunjukkan hubungan arus keluaran sel surya yang dipengaruhi oleh tegangan, suhu, dan resistansi internal.

2.2.2.3 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja PV

Kinerja modul *photovoltaic* (PV) sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal dan internal yang menentukan besarnya daya listrik yang dapat dihasilkan. Karakteristik keluaran PV bersifat *nonlinier* dan dinamis, sehingga perubahan kondisi lingkungan maupun parameter internal modul dapat menyebabkan pergeseran titik operasi dan titik daya maksimum. Pemahaman terhadap faktor-faktor yang memengaruhi kinerja PV menjadi sangat penting, terutama dalam perancangan dan implementasi sistem *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*, agar sistem mampu beradaptasi terhadap variasi kondisi operasi dan tetap menghasilkan daya yang optimal. Beberapa faktor utama yang berpengaruh terhadap kinerja modul PV meliputi intensitas radiasi matahari, suhu modul, kondisi shading, serta parameter resistansi internal modul.

1. Radiasi matahari menyebabkan semakin tinggi intensitas, semakin besar daya keluaran : Semakin besar intensitas cahaya matahari yang diterima permukaan panel, maka daya listrik yang dihasilkan juga meningkat. Hubungan antara intensitas radiasi dan daya keluaran PV bersifat linier hingga batas tertentu, di mana peningkatan intensitas akan menaikkan arus keluaran.
2. Kenaikan suhu menurunkan tegangan maksimum PV : Peningkatan suhu modul PV akan menurunkan tegangan keluaran karena efek termal terhadap material semikonduktor. Secara umum, setiap kenaikan suhu sebesar 1°C dapat menurunkan efisiensi panel sekitar 0,3%–0,5%.
3. Shading (bayangan) dapat mengurangi *Output* daya secara signifikan : Bayangan parsial pada permukaan modul, baik dari bangunan, pohon, atau debu, dapat mengurangi jumlah radiasi yang diterima oleh sel surya. Efek shading tidak hanya menurunkan daya keluaran tetapi juga dapat menyebabkan hot spot, yaitu kenaikan suhu lokal pada sel tertentu yang bisa merusak modul PV. Untuk mengurangi dampaknya, sistem PV biasanya dilengkapi dengan bypass *diode* yang membantu menjaga distribusi arus tetap merata saat sebagian sel tertutup bayangan.
4. Resistansi seri & *shunt* dapat mempengaruhi kurva I–V dan efisiensi modul : Resistansi seri (R_s) dan resistansi *shunt* (R_{sh}) sangat memengaruhi bentuk karakteristik kurva arus-tegangan (I–V) modul PV. Untuk memahami pengaruh resistansi internal terhadap kinerja modul surya, karakteristik kurva arus–tegangan (I–V) dan daya–tegangan (P–V) perlu dianalisis. Hubungan antara resistansi seri, resistansi *shunt*, serta rugi-rugi daya terhadap perubahan kurva I–V dan P–V ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Pengaruh resistansi seri dan *shunt* terhadap kurva I–V dan P–V modul surya

Berdasarkan gambar 2.4 menunjukkan bahwa resistansi seri (R_s) menyebabkan terjadinya penurunan arus dan daya keluaran terutama pada daerah tegangan tinggi sehingga titik daya maksimum bergeser dan efisiensi modul menurun. Sementara itu, resistansi *shunt* (R_{sh}) menimbulkan kebocoran arus pada modul yang menyebabkan penurunan arus pada kondisi tegangan rendah. Kombinasi kedua rugi-rugi tersebut mempengaruhi bentuk kurva I–V dan P–V serta menentukan besar daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh modul surya. Nilai resistansi seri dan *shunt* yang tidak ideal akan menyebabkan penurunan performa dan efisiensi sistem fotovoltaik.

2.2.3 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

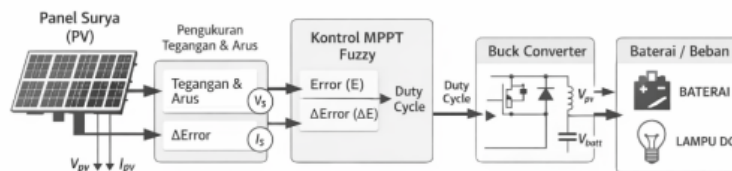
Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan suatu teknik pengendalian yang digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran sistem *photovoltaic* (PV) agar selalu beroperasi pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*/MPP). Mengingat karakteristik modul PV yang bersifat *nonlinier* serta sangat dipengaruhi oleh variasi kondisi lingkungan seperti intensitas radiasi matahari dan suhu, titik daya maksimum dapat berpindah secara dinamis. Tanpa penerapan MPPT, sistem PV cenderung bekerja pada titik operasi yang tidak optimal sehingga daya yang dihasilkan tidak maksimal. Oleh karena itu, MPPT menjadi komponen penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya, terutama untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi dan kinerja keseluruhan sistem.

2.2.3.1 Konsep MPPT

Setiap panel surya memiliki titik daya maksimum (*Maximum Power Point*/MPP). Karena kondisi radiasi dan suhu selalu berubah, posisi MPP juga berubah. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) adalah metode untuk melacak titik daya maksimum tersebut agar keluaran PV selalu optimal (Esrasm & Chapman, 2019; [8]).

Untuk memahami konsep kerja *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), diperlukan ilustrasi sistem yang menunjukkan hubungan antara panel surya, kontrol MPPT, dan konverter daya. Sistem MPPT bekerja dengan mengatur tegangan dan arus keluaran panel melalui konverter DC–DC sehingga panel selalu beroperasi pada titik

daya maksimum. Diagram sistem MPPT pada panel surya dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 5 Konsep MPPT pada Panel Surya

2.2.3.2 Metode Konvensional MPPT

Metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) konvensional merupakan pendekatan pengendalian yang banyak digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya dengan memanfaatkan hubungan antara tegangan, arus, dan daya. Algoritma pada metode ini umumnya bekerja dengan melakukan perubahan kecil (*Perturbasi*) pada parameter kendali sistem, seperti tegangan atau *duty cycle* konverter DC–DC, kemudian mengevaluasi respon perubahan daya yang dihasilkan. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, sistem menentukan arah pengaturan selanjutnya untuk mendekati titik daya maksimum.

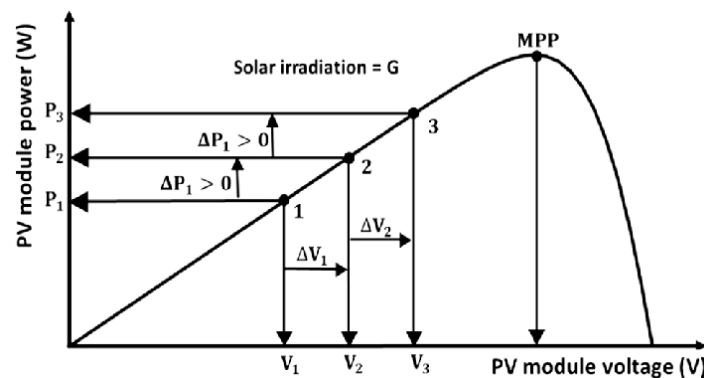
Metode MPPT konvensional dikenal memiliki struktur algoritma yang sederhana dan mudah diimplementasikan, sehingga banyak diaplikasikan pada sistem fotovoltaik skala kecil hingga menengah. Namun demikian, performa metode ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan karakteristik beban, sehingga pada kondisi tertentu dapat menimbulkan osilasi di sekitar titik daya maksimum atau respon pelacakan yang relatif lambat. Beberapa algoritma MPPT konvensional yang paling umum digunakan dan sering dijadikan acuan dalam penelitian antara lain *Perturb and Observe (P&O)*, *Incremental Conductance (Inccond)*, dan *Hill Climbing*.

a. *Perturb and Observe (P&O)*

Prinsip: *duty cycle* diubah secara periodik, lalu perubahan daya diamati. Jika daya naik, arah *Perturbasi* dilanjutkan; jika daya turun, arah *Perturbasi* dibalik. Adapun kelebihan dan kekurangan dari metode *Perturb* dan *Observe (P&O)* sebagai berikut:

1. Kelebihan: sederhana, mudah diimplementasikan.
2. Kekurangan: menimbulkan osilasi di sekitar MPP dan respon lambat (Hassaine et al., 2020; [9]).

Untuk memperjelas karakteristik metode *Perturb and Observe (P&O)* yang menimbulkan osilasi di sekitar titik daya maksimum serta respon pelacakan yang relatif lambat, dapat dilihat pada grafik karakteristik tracking daya terhadap waktu pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Karakteristik Osilasi Metode P&O di Sekitar Titik MPP

3. Incremental *CON*ductance (Inc CON d)

Prinsip: menggunakan kondisi pada MPP, yaitu $\Delta I/\Delta V = -I/V$. Dengan membandingkan *kON*duktansi incremental dengan *kON*duktansi instan, algoritma menentukan arah perubahan *duty cycle* (Alsumiri, 2021; [10]).

4. Hill Climbing

Metode ini mirip dengan P&O, hanya saja variabel yang diubah adalah *duty cycle*, bukan tegangan. Metode ini masih memiliki kelemahan berupa osilasi (Liu et al., 2019; [11]).

2.2.3.3 Keterbatasan MPPT Konvensional

Metode konvensional *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dirancang berdasarkan pendekatan deterministik dengan melakukan pengamatan langsung terhadap perubahan parameter listrik panel surya, seperti tegangan, arus, dan daya. Meskipun metode ini memiliki kompleksitas komputasi yang rendah dan mudah diimplementasikan, kinerjanya sangat dipengaruhi oleh dinamika kondisi lingkungan. Pada kondisi iradiasi yang berubah secara cepat atau tidak seragam, algoritma MPPT konvensional cenderung mengalami keterlambatan dalam merespons pergeseran titik daya maksimum, sehingga menyebabkan penurunan efisiensi sistem. Selain itu, karakteristik algoritma yang berbasis perturbasi dapat menimbulkan osilasi di sekitar titik daya maksimum serta kurang mampu beradaptasi pada kondisi partial shading. Adapun beberapa keterbatasan dari metode konvensional MPPT antara lain sebagai berikut:

- a. Respon lambat terhadap perubahan radiasi yang cepat.
- b. Menimbulkan osilasi di sekitar titik daya maksimum.
- c. Kurang efektif saat terjadi partial shading.

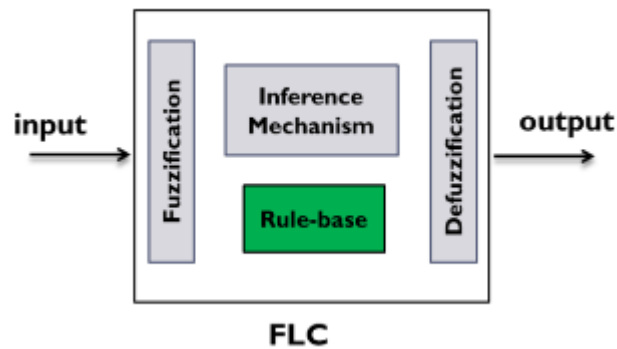
Oleh karena itu, diperlukan metode MPPT yang lebih adaptif dan mampu menangani ketidakpastian sistem, salah satunya melalui penerapan algoritma berbasis kecerdasan buatan seperti logika fuzzy.

2.2.4 Logika Fuzzy

Logika fuzzy merupakan pendekatan logika yang dikembangkan untuk menangani sistem yang bersifat *nonlinier*, kompleks, dan mengandung ketidakpastian. Berbeda dengan logika klasik yang hanya mengenal dua kondisi, yaitu benar atau salah, logika fuzzy memungkinkan suatu variabel memiliki tingkat keanggotaan tertentu dalam suatu himpunan. Konsep ini memberikan fleksibilitas dalam memodelkan perilaku sistem yang sulit direpresentasikan secara matematis secara presisi.

Dalam penerapannya pada sistem kendali, logika fuzzy diwujudkan dalam bentuk suatu pengendali yang dikenal sebagai *Fuzzy Logic Controller (FLC)*. FLC digunakan untuk memproses masukan sistem berdasarkan aturan-aturan linguistik

yang menyerupai cara berpikir manusia. Secara umum, struktur FLC terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu proses fuzzifikasi, mekanisme inferensi berbasis rule-base, dan proses defuzzifikasi yang menghasilkan keluaran berupa sinyal kendali. Struktur dasar dari FLC tersebut ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. 7 Diagram Blok *Fuzzy Logic Controller*

Sumber : Wahab at al. (2017)

2.2.4.1 Komponen *Fuzzy Logic Controller (FLC)*

Fuzzy Logic Controller (FLC) merupakan sistem pengendali berbasis logika fuzzy yang dirancang untuk memproses masukan dan menghasilkan keluaran berdasarkan aturan-aturan linguistik. Agar proses pengambilan keputusan dapat berjalan secara sistematis, FLC disusun dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi. Setiap komponen memiliki peran tertentu dalam mengubah data *input* numerik menjadi sinyal kendali yang sesuai dengan kondisi sistem. Secara umum, FLC memiliki empat tahap utama (Ross, 2019; [12]):

1. Fuzzifikasi: Mengubah *input* numerik menjadi variabel linguistik, misalnya “rendah”, “sedang”, dan “tinggi”.
2. Rule Base: Kumpulan aturan IF–THEN yang dirancang berdasarkan pengalaman atau pengetahuan pakar.
3. Inferensi Fuzzy: Proses pengambilan keputusan berdasarkan aturan yang berlaku.
4. Defuzzifikasi: Mengubah hasil fuzzy menjadi *Output* numerik agar dapat digunakan oleh sistem.

2.2.4.2 Metode Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam *Fuzzy Logic Controller (FLC)* yang berfungsi untuk mengubah keluaran fuzzy yang masih berbentuk himpunan linguistik menjadi nilai numerik tegas. Nilai crisp ini diperlukan agar hasil keputusan dari sistem fuzzy dapat digunakan secara langsung sebagai sinyal kendali pada sistem nyata. Pemilihan metode defuzzifikasi sangat berpengaruh terhadap karakteristik respon sistem, seperti kehalusan keluaran, kestabilan, dan kecepatan respon. Oleh karena itu, berbagai metode defuzzifikasi telah dikembangkan dan digunakan sesuai dengan kebutuhan aplikasi sistem kendali. Beberapa metode yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Metode *Centroid of Area (COA)*, yang juga dikenal sebagai metode *Center of Gravity*, merupakan metode defuzzifikasi yang paling umum digunakan dalam sistem *Fuzzy Logic Controller*. Metode ini menentukan nilai crisp dengan menghitung titik pusat dari luas area fungsi keanggotaan *Output* fuzzy. Nilai keluaran yang dihasilkan merupakan rata-rata berbobot dari seluruh kemungkinan keluaran fuzzy, sehingga mampu merepresentasikan kondisi sistem secara menyeluruh. Keunggulan utama metode COA adalah kemampuannya menghasilkan respon yang halus dan stabil, sehingga sangat cocok diterapkan pada sistem kendali yang membutuhkan kestabilan tinggi, seperti sistem MPPT berbasis logika fuzzy.
- b. Metode Bisector menentukan nilai crisp dengan mencari garis vertikal yang membagi area fungsi keanggotaan *Output* fuzzy menjadi dua bagian yang memiliki luas sama. Pendekatan ini tidak bergantung pada nilai maksimum fungsi keanggotaan, melainkan pada distribusi keseluruhan area fuzzy. Metode Bisector relatif sederhana dan dapat memberikan hasil yang cukup representatif, namun pada beberapa kasus dapat menghasilkan keluaran yang kurang halus dibandingkan metode centroid, terutama ketika bentuk fungsi keanggotaan tidak simetris.
- c. *Mean of Maximum (MOM)*, *Smallest of Maximum (SOM)*, dan *Largest of Maximum (LOM)*. Metode *Mean of Maximum (MOM)* menentukan nilai crisp berdasarkan rata-rata dari nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan

maksimum. Metode ini memiliki keunggulan dari segi kesederhanaan dan kecepatan komputasi, namun cenderung menghasilkan respon yang kurang halus karena hanya mempertimbangkan nilai puncak fungsi keanggotaan. Sementara itu, metode *Smallest of Maximum (SOM)* dan *Largest of Maximum (LOM)* masing-masing memilih nilai terkecil atau terbesar dari domain yang memiliki derajat keanggotaan maksimum. Pemilihan antara SOM atau LOM umumnya disesuaikan dengan kebutuhan sistem kendali, khususnya ketika diperlukan kecenderungan keluaran yang lebih konservatif atau lebih agresif.

2.2.5 Implementasi Fuzzy pada MPPT

Penggunaan logika fuzzy dalam sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) bertujuan untuk mengatasi keterbatasan metode MPPT konvensional, seperti terjadinya osilasi di sekitar titik daya maksimum dan respon sistem yang relatif lambat terhadap perubahan kondisi lingkungan. Dengan memanfaatkan aturan-aturan linguistik dan mekanisme inferensi fuzzy, sistem MPPT mampu melakukan pengambilan keputusan secara lebih adaptif tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Implementasi fuzzy pada MPPT dilakukan dengan mendefinisikan sejumlah variabel *input* dan *Output* yang merepresentasikan kondisi operasi panel surya serta sinyal kendali yang akan diberikan kepada konverter DC–DC. Variabel-variabel ini digunakan sebagai dasar dalam proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan pengaturan *duty cycle* yang optimal.

2.2.5.1 Variabel *Input* dan *Output*

Dalam sistem MPPT berbasis logika fuzzy, variabel *input* dan *Output* dipilih untuk merepresentasikan kondisi operasi panel surya serta respon kendali yang diberikan pada konverter DC–DC. Variabel *input* digunakan untuk menggambarkan posisi titik kerja sistem terhadap titik daya maksimum, sedangkan variabel *Output* berfungsi sebagai sinyal kendali untuk mengatur *duty cycle* konverter. Pada penelitian ini, variabel *input* yang digunakan adalah *Error* (E) dan perubahan *Error* (ΔE), sementara variabel *Output* berupa perubahan *duty cycle* (D) pada *Buck Converter*.

- a. *Error* (E): perubahan daya relatif terhadap tegangan : *Error* (E) merupakan perubahan daya relatif terhadap tegangan pada sistem PV, yang menunjukkan seberapa jauh posisi kerja sistem dari titik daya maksimum (*Maximum Power Point*). Nilai *Error* digunakan sebagai acuan dalam menentukan arah koreksi sistem MPPT agar dapat mencapai titik daya maksimum dengan cepat.

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (2.2)$$

Keterangan: Persamaan (2.2) digunakan untuk menentukan nilai *Error* yang menunjukkan perubahan daya terhadap tegangan

$E(k)$ = nilai *Error* pada waktu ke-k

$P(k)$ dan $P(k-1)$ = masing-masing adalah daya keluaran PV pada waktu ke-k dan ke-(k-1).

$V(k)$ dan $V(k-1)$ = merupakan tegangan keluaran PV pada waktu ke-k dan ke-(k-1).

Nilai $E(k)$ menunjukkan arah perubahan daya terhadap tegangan:

1. Jika $E(k) > 0$ maka sistem berada di sisi kiri titik MPP, maka *duty cycle* harus dinaikkan.
2. Jika $E(k) < 0$ maka sistem berada di sisi kanan titik MPP, maka *duty cycle* harus diturunkan.

- b. Perubahan *Error* (ΔE): selisih *Error* antara waktu sekarang dengan sebelumnya :
Perubahan *Error* (ΔE) menunjukkan selisih antara nilai *Error* saat ini dengan nilai *Error* sebelumnya. Parameter ini digunakan untuk menentukan kecepatan perubahan sistem agar respon MPPT lebih stabil dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (2.3)$$

Keterangan: Persamaan (2.3) menggambarkan perubahan *Error* antara dua waktu pengukuran yang berurutan :

$\Delta E(k)$ adalah perubahan *Error* antara dua waktu pengukuran yang berurutan.

Nilai ini digunakan untuk mengatur arah dan besar koreksi *duty cycle* pada *Converter*. Jika $\Delta E(k)$ bernilai besar, berarti perubahan daya terhadap tegangan

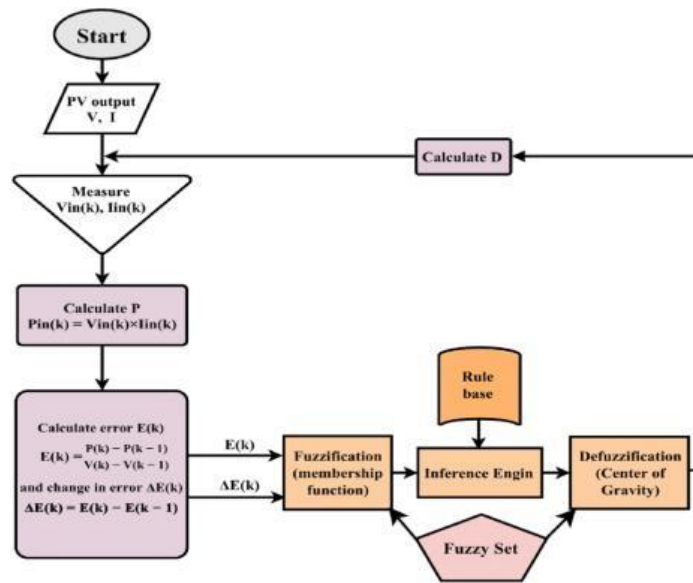
terjadi cepat sehingga sistem perlu melakukan penyesuaian yang lebih halus untuk menghindari osilasi di sekitar titik MPP.

c. *Output (D)*: perubahan *duty cycle* pada *Buck Converter*.

2.2.5.2 Rule base fuzzy Untuk MPPT

Rule base fuzzy merupakan inti dari sistem pengendali logika fuzzy yang berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan dalam proses *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Aturan fuzzy disusun berdasarkan hubungan antara variabel *input* berupa *Error* (E) dan perubahan *Error* (ΔE) terhadap variabel *Output*, yaitu perubahan *duty cycle* (D) pada konverter DC–DC. Nilai *Error* dan $\Delta Error$ diperoleh dari perbedaan daya atau tegangan keluaran panel surya pada dua kondisi pengukuran yang berurutan, sehingga mencerminkan arah pergeseran titik operasi terhadap titik daya maksimum. Melalui rule base yang dirancang secara tepat, sistem fuzzy MPPT mampu menentukan respon s kendali yang sesuai untuk mengarahkan titik operasi panel surya menuju kondisi daya maksimum secara cepat dan stabil tanpa memerlukan model matematis yang kompleks.

Struktur *Rule base fuzzy* pada sistem MPPT yang menggunakan variabel *input Error* (E) dan perubahan *Error* (ΔE) serta menghasilkan *Output* berupa perubahan *duty cycle* dapat digambarkan dalam bentuk diagram sistem fuzzy seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Struktur *Fuzzy Logic Controller* pada Sistem MPPT

Sebagai acuan dalam perancangan *Rule base fuzzy* MPPT, diperlukan aturan logika yang disusun berdasarkan pendekatan empiris dan hasil penelitian terdahulu. Aturan-aturan ini menggambarkan hubungan logis antara nilai *Error*, perubahan *Error*, dan respon s kendali sistem dalam menyesuaikan *duty cycle* konverter DC–DC. Salah satu contoh penerapan *Rule base fuzzy* yang banyak digunakan dan terbukti efektif dalam sistem MPPT ditunjukkan pada penelitian sebelumnya, sebagaimana disajikan pada tabel berikut 2.1.

Tabel 2. 1 Aturan Fuzzy

<i>Error</i> (E)	$\Delta Error$ (ΔE)	<i>Duty cycle</i> (D)
NB	NB	NB
NB	ZE	NS
NS	ZE	NS
ZE	ZE	ZE
PS	ZE	PS
PB	ZE	PB

Keterangan simbol:

NB : *Negative Big* (nilai sangat negatif/jauh dari MPP)

NS : *Negative Small* (nilai negatif kecil/mendekati MPP)

ZE : *Zero* (nilai mendekati nol atau pada titik MPP)

PS : *Positive Small* (nilai positif kecil/sedikit menjauhi MPP)

PB : *Positive Big* (nilai sangat positif/jauh dari MPP)

Berdasarkan tabel 2.1 menunjukkan bahwa aturan dasar logika fuzzy (rule base) yang digunakan untuk menentukan perubahan *duty cycle* berdasarkan *Error* dan perubahan *Error*. Aturan fuzzy di atas menunjukkan hubungan antara nilai *Error* (E) dan perubahan *Error* (ΔE) terhadap perubahan *duty cycle* (ΔD). Kombinasi E dan ΔE menentukan tindakan pengaturan tegangan *Converter* agar sistem selalu berada pada titik daya maksimum (MPP).

2.2.5.3 Proses Kendali Fuzzy MPPT

Proses kendali pada sistem MPPT berbasis logika fuzzy dilakukan melalui serangkaian tahapan yang saling terintegrasi untuk memastikan panel surya dapat beroperasi mendekati titik daya maksimum. Setiap tahapan dirancang untuk mengolah informasi kondisi sistem, mulai dari pengukuran parameter listrik hingga pengambilan keputusan kendali terhadap konverter DC–DC. Alur proses ini memungkinkan sistem fuzzy MPPT merespon s perubahan kondisi lingkungan secara adaptif dan menghasilkan pengaturan *duty cycle* yang optimal. Secara umum, proses kendali fuzzy MPPT meliputi langkah-langkah berikut:

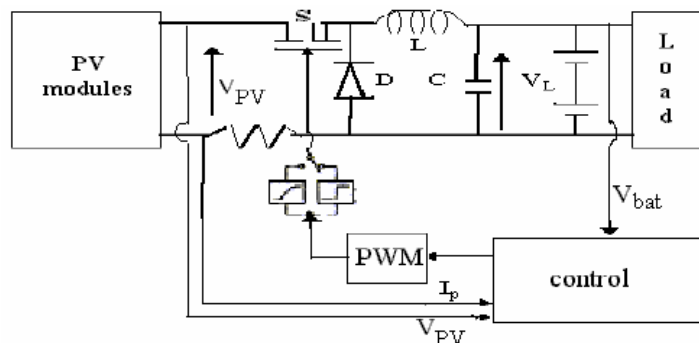
- a. Mengukur tegangan dan arus PV.
- b. Menghitung daya keluaran PV.
- c. Menghitung *Error* (E) dan perubahan *Error* (ΔE). (Persamaan 2.3)
- d. Melakukan fuzzifikasi *input*.
- e. Menentukan keputusan berdasarkan rule base.
- f. Defuzzifikasi untuk menghasilkan *duty cycle* baru.
- g. Mengatur *Buck Converter* berdasarkan *duty cycle*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa fuzzy MPPT memiliki respon lebih cepat, osilasi lebih kecil, dan efisiensi lebih tinggi dibandingkan metode P&O (Zhou et al., 2021; [13]).

2.2.6 Konverter DC-DC

Konverter DC–DC adalah perangkat elektronika daya yang digunakan untuk mengubah tegangan DC dari satu level ke level lainnya. Konverter ini memanfaatkan prinsip *Switching (ON-OFF)* yang dikombinasikan dengan induktor dan kapasitor sebagai penyimpan energi. "Dalam sistem MPPT, perangkat keras utama yang digunakan untuk meregulasi tegangan adalah DC-DC *Converter*. Penggunaan modul *Buck Converter* memungkinkan penurunan tegangan dari panel surya ke level yang dibutuhkan baterai dengan meminimalkan kerugian daya. Sebagaimana dijelaskan dalam penelitian (Widyantoro, dkk, 2019;[14]), pengaturan *duty cycle* melalui sinyal PWM (*Pulse Width ModulatiON*) menjadi kunci utama dalam mentransformasikan impedansi beban agar sesuai dengan impedansi sumber, sehingga transfer daya maksimum dapat tercapai."

KONfigurasi rangkaian *Buck Converter* yang digunakan untuk menurunkan tegangan serta pengaturan *duty cycle* menggunakan sinyal PWM pada sistem MPPT dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Rangkaian *Buck Converter* dengan Pengaturan *Duty cycle* PWM

Berdasarkan gambar 2.9 menunjukkan konfigurasi rangkaian *Buck Converter* yang digunakan pada sistem MPPT berbasis fuzzy logic. *Buck Converter* berfungsi sebagai konverter DC–DC *step-down* yang digunakan untuk menurunkan tegangan dari panel surya menuju beban. Proses penurunan tegangan dilakukan melalui pengaturan *duty cycle* pada saklar (*Switch*) yang dikendalikan oleh sinyal PWM. Pada penelitian ini, pengaturan *duty cycle* dihasilkan oleh fuzzy MPPT *controller* sehingga tegangan kerja panel surya dapat disesuaikan untuk mencapai titik daya maksimum (*Maximum Power Point*). Induktor dan kapasitor berfungsi sebagai filter untuk menjaga

kestabilan arus dan tegangan keluaran agar sistem tetap stabil. Dengan konfigurasi ini, *Buck Converter* berperan penting dalam meningkatkan efisiensi dan kestabilan daya pada sistem *photovoltaic*.

2.2.6.1 Jenis-Jenis Konverter DC–DC

Konverter DC–DC merupakan komponen penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya, khususnya pada implementasi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Konverter ini berfungsi sebagai pengatur tingkat tegangan antara panel surya dan beban atau sistem penyimpanan energi, sehingga daya yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal. Pemilihan jenis konverter DC–DC disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi dan karakteristik tegangan sistem. Secara umum, konverter DC–DC dapat diklasifikasikan berdasarkan kemampuannya dalam menaikkan, menurunkan, atau mengubah polaritas tegangan keluaran. Jenis-jenis konverter DC–DC yang umum digunakan antara lain sebagai berikut:

1. *Buck Converter* berfungsi untuk menurunkan tegangan *input*
2. *Boost Converter* berfungsi untuk menaikkan tegangan *input*.
3. *Buck-Boost Converter* berfungsi untuk dapat menaikkan maupun menurunkan tegangan.
4. *Cuk Converter* berfungsi menghasilkan tegangan *Output* berpolaritas terbalik

2.2.6.2 Mode Operasi

Konverter DC–DC dapat beroperasi dalam dua mode *CONTinuous CONductiON Mode* (CCM) dan *DiscONtinuous CONductiON Mode* (DCM):

1. *CONTinuous CONductiON Mode* (CCM): arus induktor tidak pernah mencapai nol.
2. *DiscONtinuous CONductiON Mode* (DCM): arus induktor mencapai nol selama periode *Switching*.

2.2.6.3 Perbandingan Konverter

Pemilihan topologi *Converter* merupakan tahapan krusial dalam perancangan sistem MPPT, karena setiap jenis konverter memiliki karakteristik transfer daya dan efisiensi yang berbeda-beda. Dalam implementasi sistem tenaga surya, pemilihan ini didasarkan pada kebutuhan tegangan beban (baterai) terhadap tegangan masukan dari

panel surya. Secara umum, terdapat tiga jenis konverter DC-DC yang sering digunakan, yaitu *Buck Converter* untuk menurunkan tegangan, *Boost Converter* untuk menaikkan tegangan, dan *Buck-Boost Converter* yang memiliki kemampuan keduanya.

Perbandingan antara ketiga topologi tersebut ditinjau dari beberapa aspek utama, seperti kompleksitas rangkaian, efisiensi konversi, serta polaritas tegangan keluaran. Sebagaimana dijelaskan oleh (Widyantoro, Sirait, dkk, 2019;), penggunaan *Buck Converter* sangat efektif dalam aplikasi pengisian baterai karena mampu menghasilkan arus yang lebih besar pada sisi luaran dengan tingkat riak (*ripple*) yang dapat dikontrol. Analisis mendalam mengenai perbedaan karakteristik dari masing-masing jenis konverter tersebut disajikan pada Tabel 2.2 sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Perbandingan Konverter

Jenis Konverter	Fungsi	Kelebihan	Kekurangan
<i>Buck</i>	Penurun tegangan	Efisiensi tinggi, sederhana	Hanya bisa menurunkan tegangan
<i>Boost</i>	Penaik tegangan	Cocok untuk PV tegangan rendah	Tegangan <i>Output</i> bisa tidak stabil
<i>Buck-Boost</i>	Naik/turun tegangan	Fleksibel	Tegangan <i>Output</i> polaritas terbalik

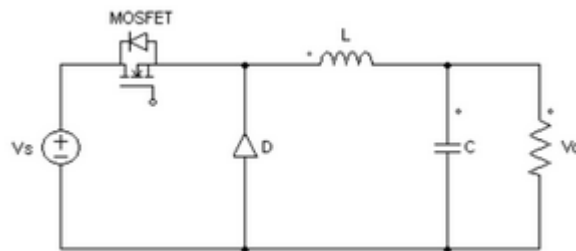
Berdasarkan tabel 2.2 dapat memberikan perbandingan berbagai jenis konverter DC–DC berdasarkan fungsi, kelebihan, dan kekurangannya. Konverter DC–DC sangat penting dalam sistem PV karena memungkinkan panel surya menyesuaikan tegangan keluarannya dengan beban atau baterai yang digunakan.

2.2.7 *Buck Converter*

Buck Converter adalah salah satu jenis konverter DC–DC yang berfungsi menurunkan tegangan *input* (V_{in}) menjadi tegangan *Output* (V_o) yang lebih rendah.

Konverter ini banyak digunakan pada sistem PV karena mampu menyesuaikan tegangan panel dengan kebutuhan beban atau baterai (Kumar et al., 2022; [15]).

Buck Converter merupakan jenis *nON isolated DC-DC Converter* yang digunakan untuk menurunkan tegangan masukan dengan melakukan pengaturan nilai *duty cycle*. *Buck Converter* beroperasi dalam 2 kondisi, yaitu ketika saklar tertutup dan ketika saklar terbuka. Pada saat kondisi saklar tertutup (kondisi *ON*), dioda berada dalam kondisi *reverse-biased*, maka dioda terbias mundur sehingga arus induktor mengalir menuju beban dan menjadikan tegangan induktor bernilai positif. Karena perubahan arus adalah konstan positif, maka arus naik secara linier. Pada saat kondisi saklar terbuka (kondisi *OFF*), dioda berada dalam kondisi *forward-biased*, maka dioda menjadi bias maju yang menyebabkan arus induktor akan mengalir ke sisi beban. Rangkaian dasar *buck converter* tersebut dapat dilihat pada gambar 2.10 berikut.



Gambar 2. 10 Rangkain Dasar *Buck* Konverter

Gambar 2.10 menunjukkan bahwa rangkaian *Buck Converter* yang digunakan sebagai konverter DC–DC *step-down* pada sistem MPPT. *Buck Converter* berfungsi menurunkan tegangan dari panel surya menuju beban melalui proses *Switching* pada MOSFET yang dikendalikan oleh sinyal PWM dari sistem kontrol. Pengaturan *duty cycle* pada MOSFET memungkinkan tegangan keluaran diatur sehingga panel surya dapat bekerja pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*). Induktor dan kapasitor berfungsi sebagai filter untuk menjaga kestabilan arus dan tegangan keluaran agar sistem bekerja secara optimal.

2.2.7.1 Prinsip Dasar *Buck Converter*

Buck Converter bekerja berdasarkan prinsip *Switching* dengan menggunakan komponen utama berupa MOSFET/IGBT, dioda, induktor, dan kapasitor. *Duty cycle* (D) dari sinyal PWM yang mengendalikan *Switch* menentukan besar tegangan *Output*:

$$V_o = D \cdot V_{in} \quad 2.4 \quad (2.4)$$

dengan $0 < D < 1$.

Keterangan: Persamaan (2.4) menunjukkan bahwa pengaturan *duty cycle* (D) secara langsung dapat mengontrol besar kecilnya tegangan keluaran (V_o). Dengan mengubah nilai D menggunakan pengendali seperti MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), sistem dapat menyesuaikan tegangan *Output* konverter agar selalu beroperasi pada titik daya maksimum (MPP) dari modul PV.

V_o = tegangan keluaran (V)

V_{in} = tegangan masukan (V)

D = *duty cycle*, yaitu rasio waktu *ON* transistor terhadap total periode *Switching*.

Nilai D menentukan besar kecilnya tegangan keluaran konverter.

2.2.7.2 Mode Operasi

Buck Converter bekerja berdasarkan prinsip pensaklaran yang mengatur aliran energi dari sumber menuju beban melalui komponen induktor dan dioda. Proses kerja *Buck Converter* dapat dijelaskan melalui dua kondisi utama yang terjadi secara periodik sesuai dengan sinyal PWM yang diberikan pada saklar. Kedua kondisi ini menentukan proses penyimpanan dan pelepasan energi pada induktor, sehingga berpengaruh langsung terhadap tegangan dan arus keluaran konverter. Secara umum, mode operasi *Buck Converter* terdiri dari dua keadaan, yaitu *ON State* dan *OFF State*, yang dijelaskan sebagai berikut:

1. *ON State* (*Switch* tertutup): arus mengalir dari sumber ke induktor dan beban, energi tersimpan dalam induktor.
2. *OFF State* (*Switch* terbuka): induktor melepaskan energi ke beban melalui dioda.

2.2.7.3 Ripple Tegangan dan Arus.

Arus induktor dan tegangan *Output* mengalami fluktuasi (*ripple*). Besar *ripple* dipengaruhi oleh nilai induktor (L) dan kapasitor (C). Rumus perkiraan *ripple* arus induktor (CCM):

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} \cdot D \cdot (1-D)}{f \cdot L} \quad (2.5)$$

Keterangan : Persamaan (2.5) digunakan untuk menentukan ukuran induktor yang tepat agar fluktuasi arus (*ripple current*) tetap dalam batas yang diinginkan, biasanya antara 10–30% dari arus rata-rata induktor. Nilai ΔI_L yang terlalu besar dapat menyebabkan rugi daya dan gangguan kestabilan sistem.

ΔI_L = perubahan arus induktor (ampere, A)

V_{in} = tegangan masukan konverter (volt, V)

D = *duty cycle*, rasio waktu *ON* terhadap total periode *Switching*

f = frekuensi *Switching* (hertz, Hz)

L = induktansi komponen induktor (henry, H)

2.2.7.4 Keunggulan Buck Converter

Buck Converter banyak digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga surya karena karakteristiknya yang efisien dan sesuai untuk aplikasi penurunan tegangan. Dalam sistem PV, konverter ini berperan penting sebagai penghubung antara panel surya dan beban atau sistem penyimpanan energi, khususnya ketika tegangan keluaran panel lebih tinggi dibandingkan tegangan yang dibutuhkan. Pemilihan *Buck Converter* didasarkan pada beberapa keunggulan utama yang mendukung kinerja sistem MPPT secara keseluruhan, antara lain sebagai berikut:

1. Efisiensi tinggi (>90%).
2. Rangkaian sederhana dan andal.
3. Cocok untuk sistem PV dengan kebutuhan tegangan *Output* lebih rendah.

2.2.8 Kontrol Tidak Langsung

Kontrol tidak langsung adalah strategi pengendalian di mana sinyal kendali (*duty cycle*) tidak dihitung secara langsung dari model matematis panel surya, tetapi ditentukan melalui variabel perantara, misalnya *Error* dan perubahan *Error* yang diproses menggunakan fuzzy logic.

2.2.8.1 Konsep Kontrol Tidak Langsung

Pada sistem MPPT berbasis logika fuzzy, metode kontrol yang digunakan umumnya bersifat tidak langsung (*indirect control*), di mana nilai *duty cycle* tidak dihitung secara eksplisit melalui model matematis panel surya. *Duty cycle* diperoleh sebagai hasil dari proses inferensi fuzzy yang memanfaatkan variabel *input* berupa *Error* (E) dan perubahan *Error* (ΔE). Kedua variabel ini merepresentasikan kondisi operasi sistem terhadap titik daya maksimum serta arah dan laju perubahan daya, sehingga informasi yang dihasilkan cukup untuk menentukan aksi kendali yang sesuai. Dengan pendekatan ini, sistem MPPT tidak memerlukan model panel surya yang detail maupun parameter listrik yang kompleks, seperti resistansi internal atau karakteristik *nonlinier* modul PV.

Keunggulan utama dari konsep kontrol tidak langsung adalah kemampuannya untuk beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan, seperti variasi radiasi matahari dan suhu, tanpa memerlukan proses identifikasi model secara berulang. Logika fuzzy memungkinkan sistem kendali meniru cara pengambilan keputusan manusia melalui aturan linguistik IF–THEN, sehingga respon sistem menjadi lebih fleksibel dan robust terhadap ketidakpastian. Selain itu, pendekatan ini dapat mengurangi osilasi di sekitar titik daya maksimum serta meningkatkan kecepatan pelacakan MPP dibandingkan metode konvensional. Oleh karena itu, kontrol tidak langsung berbasis fuzzy logic banyak diterapkan pada sistem MPPT modern karena kesederhanaan implementasi dan performanya yang adaptif (Bacha et al., 2021; [16])

2.2.8.2 Keunggulan Kontrol Tidak Langsung

Pendekatan kontrol tidak langsung pada sistem MPPT berbasis logika fuzzy memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya banyak digunakan dalam sistem

pembangkit listrik tenaga surya modern. Berbeda dengan kontrol langsung yang membutuhkan model matematis panel surya secara detail, kontrol tidak langsung hanya memanfaatkan parameter terukur seperti tegangan, arus, dan daya keluaran PV untuk menghasilkan aksi kendali. Hal ini membuat sistem menjadi lebih sederhana dalam perancangan serta lebih mudah diimplementasikan pada perangkat keras dengan keterbatasan komputasi. Selain itu, metode ini terbukti mampu memberikan respon yang lebih cepat terhadap perubahan kondisi radiasi dan suhu lingkungan, karena keputusan kendali tidak bergantung pada proses perhitungan model yang kompleks.

Keunggulan lain dari kontrol tidak langsung adalah kemampuannya dalam menangani karakteristik sistem yang bersifat *nonlinier* dan mengandung ketidakpastian, seperti pada modul fotovoltaik. Dengan memanfaatkan aturan fuzzy berbasis pengetahuan, sistem MPPT dapat beradaptasi secara fleksibel terhadap perubahan kondisi operasi tanpa perlu proses identifikasi ulang parameter sistem. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kontrol tidak langsung berbasis fuzzy logic mampu meningkatkan stabilitas sistem, mengurangi osilasi di sekitar titik daya maksimum, serta meningkatkan efisiensi pelacakan MPP dibandingkan metode konvensional dan kontrol langsung berbasis model matematis.